

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.006

CEEMDAN-小波阈值法在 爆破振动信号处理中的应用

费鸿禄, 山 杰

(辽宁工程技术大学 爆破技术研究院, 阜新 123000)

摘 要: 为了处理爆破施工中采集的振动信号的趋势项和高频噪声问题,引入了一种基于 CEEMDAN 分解和小波阈值相结合的信号处理方法。首先,通过 CEEMDAN 分解爆破振动径向信号得到一组 IMF 分量,对各个分量进行 FFT 变换,通过频谱分析筛选出趋势项分量并去除,对剩余 IMF 分量进行互相关函数特性分析筛选出含噪 IMF 分量与纯净 IMF 分量,并用自相关函数进行校核。然后,利用小波阈值将含噪 IMF 分量进行滤波处理。最后,将小波阈值滤波处理后的 IMF 分量与纯净 IMF 分量重构即为处理后信号。结果表明:该方法在消除噪声和趋势项干扰方面优势明显;与目前广泛采用的处理方法(CEEMDAN 法、小波阈值法、EMD-小波阈值法、EEMD-小波阈值法、CEEMD-小波阈值法)对比分析表明,CEEMDAN-小波阈值处理方法信噪比(SNR)为 20.460,均方根误差(RMSE)为 0.086,所用方法的客观评价指标均显示出更优的处理效果;从处理前后三维时间-频率-能量图反映了处理后信号充分保留了 2~200 Hz 频段的真实能量信息,进一步提高了爆破振动信号分析的准确性,可以应用于类似爆破振动信号的趋势项与噪声共同处理中。

关键词: CEEMDAN; 信号处理; 小波阈值; 噪声; 趋势项

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0041-07

Application of CEEMDAN-Wavelet Threshold Method in Blasting Vibration Signal Processing

FEI Hong-lu, SHAN Jie

(Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To treat the tendency term and high-frequency noise of blast vibration signals, a signal processing method based on the CEEMDAN decomposition and the wavelet threshold has been introduced. First of all, a group of IMF components is obtained through CEEMDAN decomposition of radial blast vibration signals, and then FFT transformation is carried out for each component. The trend component is screened out and removed by spectral analysis. Meanwhile, noise-containing IMF components and pure IMF components are distinguished by cross-correlation function analysis of the remaining IMF components, which is further checked by autocorrelation function. Then, the IMF components containing noise are filtered by wavelet threshold. Finally, the IMF components and the pure IMF components after the wavelet threshold filtering are reconstructed as the processed signal. The results show that this method has obvious advantages in eliminating noise and trend term interference. Compared with the widely used processing methods(CEEMDAN method, wavelet threshold method, EMD-wavelet threshold method, EEMD-wavelet threshold method, CEEMD-wavelet threshold method), the signal-to-noise ratio(SNR) of CEEMDAN wavelet threshold method is 20.460, and the root mean square error(RMSE) is 0.086. The objective evaluation indexes of the method all show better treatment effect. The 3D time-frequency-energy diagram before and after processing reflects that the processed signal fully retains the real energy information in the 2~200 Hz frequency band, which further improves the accuracy of blasting vibration signal analysis and can be applied to the joint processing of trend term and noise similar to blasting vibration signal.

Key words: CEEMDAN; signal processing; wavelet threshold; noise; trend term

爆破振动信号分析是矿业、岩土等工程界研究爆破振动效应的主要方法,但在施工现场采集的样本信息中,受施工现场复杂环境的影响,采样信息中含有大量高频噪声,同时还受到信号采样仪器松动或者温度变化产生零点漂移的情况,采样信息可能会出现形状不规则和基线偏移情况,即采样信息中产生了趋势项^[1]。两者共同作用导致采样信号失真,使爆破信号时频能量的进一步分析产生较大误差。因此,采样信号的去噪及趋势项处理就成了不可或缺的前处理工作。

目前,国内外常用的爆破振动信号的去噪方法主要有小波阈值去噪^[2]、小波包阈值去噪^[3]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法^[4]、集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法^[5]、互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)方法^[6],以及两者共同使用的 EMD-小波阈值法^[7]、EEMD-小波阈值法^[8]、CEEMD-小波阈值法等^[9]。小波类方法对不同的频率成分提供不同的分析分辨率,同时在时频域的局部化性质中有明显优势,在非平稳信号处理中备受青睐,但存在小波基难以选取,分解层数难以确定的缺点。目前对信号的趋势项消除方法主要有 EMD 法^[10]、EEMD 法^[11]、变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)法等^[12],而同时对两者进行处理的方法中^[13,14],EMD 方法主要问题为端点效应和模态混叠,EEMD 方法虽然避免了 EMD 方法端点效应和模态混叠现象,但同时引入了均匀分布的白噪声。CEEMD 方法通过加入一对互为相反数的辅助白噪声解决 EEMD 方法存在的白噪声问题,但处理本质没变,分解结果难免受到残余白噪声影响。自适应噪声完备集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)方法是从 EMD 的基础上加以改进^[15],同时借用了 EEMD 方法中加入高斯白噪声和通过多次叠加并集成平均以抵消噪声的思想,能减轻端点效应和模态混叠现象,避免残余噪声影响,但处理效果还

是不够理想,容易丢失部分真实信息。

为解决 CEEMDAN 分解丢失信息以及小波基难以选取、分解层数难以确定的问题,将自适应噪声完备集合经验模态分解(CEEMDAN)和小波阈值法的优势结合起来,辅以频谱筛选并去除趋势项、互相关与自相关函数分析与校核噪声分量,提出了一种处理爆破振动信号趋势项与高频噪声的方法,对爆破振动响应研究具有重要意义。

1 爆破振动信号处理理论

1.1 CEEMDAN 分解原理

EEMD、CEEMD 分解方法是将添加白噪声后的信号直接做 EMD 分解,然后相对应的 IMF 分量直接求均值。CEEMDAN 算法是每求完一阶 IMF 分量,又重新给残余分量加入正态分布的高斯白噪声并求此时的 IMF 分量均值并逐次迭代。其详细实现过程如下^[16]:

(1)将标准正态分布的高斯白噪声 $w^i(t)$ 加入到爆破振动信号 $x(t)$ 中,则待处理信号变为 $x(t) + \zeta_0 w^i(t)$ 。使用 EMD 方法对待处理信号进行 I 次重复分解后对其进行算数平均可得到 IMF_1 分量为

$$IMF_1(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_1^i(t) \quad (1)$$

去除第一阶分量 IMF_1 后的残余分量

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (2)$$

(2)定义从待处理信号的 EMD 分解中获得的第 j 个模态函数分量的算子为 $E_j(\cdot)$ 。再次将标准正态分布的高斯白噪声 $w^i(t)$ 加入到分量 $r_1(t)$ 中,则对信号 $r_1(t) + \zeta_1 E_1[w^i(t)]$ 再次通过 EMD 方法进行 I 次重复分解,可得到 IMF_2 分量为

$$IMF_2(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1\{r_1(t) + \zeta_1 E_1[w^i(t)]\} \quad (3)$$

去除第二阶分量 IMF_2 后的残余分量

$$r_2(t) = r_1(t) - IMF_2(t) \quad (4)$$

(3)对于 $k=2,3,\dots,K$,去除 IMF_k 分量后的残余分量为

$$r_k(t) = r_{k-1}(t) - IMF_k(t) \quad (5)$$

(4)提取信号 $r_k(t) + \zeta_k E_k[w^i(t)]$ 的第一个 IMF 分量,定义 $k+1$ 个模态函数分量为

$$IMF_{k+1}(t) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_k\{r_k(t) + \zeta_k E_k[w^i(t)]\} \quad (6)$$

收稿日期:2022-06-27

作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授、博士生导师,主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作,(E-mail) feihonglu@163.com。

通讯作者:山杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程和爆破工程方面的研究,(E-mail)1814577728@qq.com。

(5) 重复执行步骤(3)和(4), 直到残余分量信号不可再继续被分解为止, 最终可以得到 K 个模态函数分量。

原始爆破振动信号可以表示为

$$x(t) = R(t) + \sum_{k=1}^K IMF_k(t) \quad (7)$$

式中, $R(t)$ 为最终残余分量。

从上述 CEEMDAN 的基本理论可以看出, 此方法在较小的平均次数下就可以有很好的完备性与模态分解结果, 计算速度上也有明显优势, 且可以改变每一阶段的噪声系数 ζ_i , 自适应的选择不同信噪比的高斯白噪声。

1.2 小波阈值方法

小波阈值法去噪的本质是对信号的滤波。小波阈值法是先通过小波变换把信号转换为不同尺度的尺度空间, 然后通过阈值处理筛选出噪声并过滤掉噪声, 最后再重构信号。小波阈值法在爆破振动信号滤波去噪中, 阈值处理至关重要。阈值处理包括阈值选择与阈值函数选择。目前阈值选择方法有 4 种, RigSure 阈值、Heursure 阈值、Sqrtwolog 阈值、Min-max 阈值。常用的阈值量化规则一般分为硬阈值与

软阈值, 硬阈值函数处理信号后会在阈值 λ 处产生局部突变。软阈值函数处理得到的信号虽然丢失了一小部分高频信号, 但信号更平滑, 消除了硬阈值函数处理引起的局部突变。

小波去噪硬阈值处理函数

$$\sigma_{\lambda}^H(w) = \begin{cases} w, & |w| \geq \lambda \\ 0, & |w| < \lambda \end{cases} \quad (8)$$

小波去噪软阈值处理函数

$$\sigma_{\lambda}^S(w) = \begin{cases} [\text{sgn}(w)(|w| - \lambda)], & |w| \geq \lambda \\ 0, & |w| < \lambda \end{cases} \quad (9)$$

式中: w 为小波系数; λ 为阈值。

1.3 CEEMDAN-小波阈值处理方法

CEEMDAN-小波阈值方法先将爆破振动信号进行 CEEMDAN 分解处理, 在判断出趋势项分量后, 对剩余 IMF 分量进行互相关系数和自相关函数分析确定噪声 IMF 分量, 对其进行小波阈值处理过滤掉噪声信息, 提取 CEEMDAN 分解丢失的部分有效信息。最后, 将小波阈值滤波处理后的 IMF 分量与纯净 IMF 分量重构得到处理后信号。完整流程如图 1 所示。

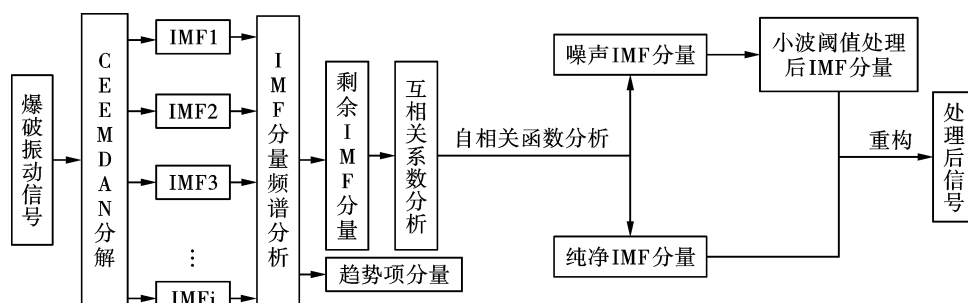


图 1 信号处理流程图

Fig. 1 Signal processing flowchart

2 工程实例分析及效果评价

选取武家塔露天矿实测的某次爆破振动径向信号, 如图 2 所示。可以看出该信号由于现场环境复杂受到较多噪声污染且有很明显的趋势项情况, 信号波形偏离基线中央, 出现失真情况。为了不影响信号时频能量的进一步分析, 需要对其进行处理。

2.1 CEEMDAN 分解

通过反复实验, 加入白噪声的噪声标准差与振动径向信号标准差的比值(幅值)为 0.2, 信号的平均次数为 100, 最大迭代次数为 2000 时, CEEMDAN 分解处理效果最好。11 个 IMF 分量 ($IMF_1 \sim IMF_{11}$) 和一个残余分量 Res 由原始爆破振动径向信号通过

CEEMDAN 分解得到, 结果如图 3 所示。

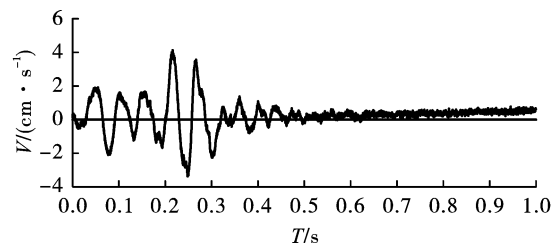


图 2 振动径向信号

Fig. 2 Vibration radial signal

2.2 振动信号处理

2.2.1 趋势项处理

对各个 IMF 分量进行 FFT (Fast Fourier Trans-

fer) 变换, 得到各个 IMF 分量的主频, 结果如表 1 所示。由于趋势项为低频干扰, 对疑似趋势项 IMF_9 、 IMF_{10} 、 IMF_{11} 和 Res 分量进行频谱主频带分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, IMF_{11} 、 Res 分量的频带主要集中分布在 $0 \sim 5$ Hz 的低频范围内, 且主频

低于爆破测振仪监测的有效范围 ($2 \sim 200$ Hz), 可能为零漂或信号变化趋势^[17]。相比之下, IMF_9 、 IMF_{10} 频带更宽, 主频在有效监测区间之内, 因此去掉 IMF_{11} 、 Res 趋势项分量。

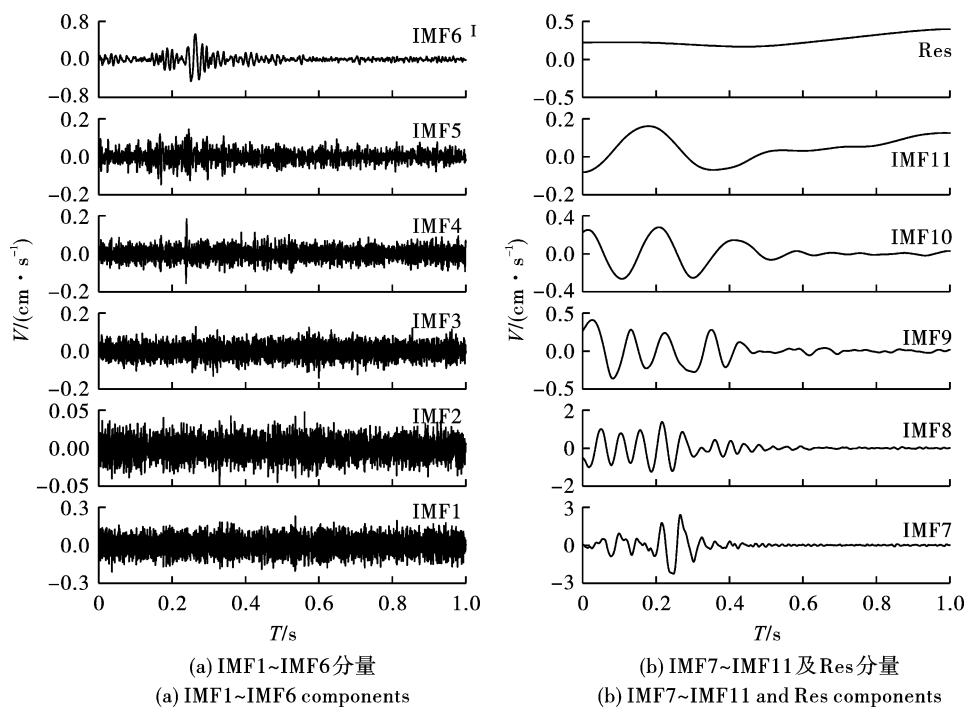


图 3 CEEMDAN 分解结果

Fig. 3 CEEMDAN decomposition results

表 1 各主频对应表

Table 1 Correspondence table of each main frequency

主频	IMF 分量											
	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6	IMF_7	IMF_8	IMF_9	IMF_{10}	IMF_{11}	Res
F/Hz	1612.0	813.5	647.5	338.9	180.7	65.4	17.6	17.6	9.8	4.9	0.00	0.00

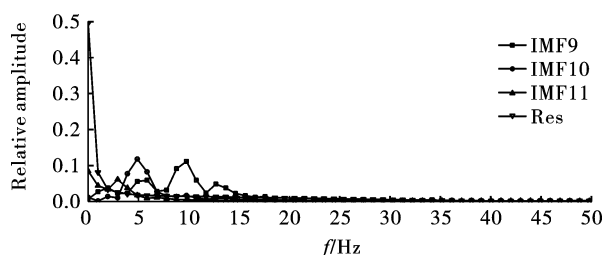


图 4 疑似趋势项频谱

Fig. 4 Spectrum of suspected trend items

2.2.2 噪声处理

将剩余 IMF 分量与振动径向信号通过 MATLAB 中的 `corrcoef` 函数求出互相关系数 R , 结果如表 2 所示。从表 2 可以看出 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 、 IMF_4 和 IMF_5 分量的互相关系数均小于 0.1, 初步认定为含噪 IMF 分量^[18]。针对 IMF_1 、 IMF_2 、 IMF_3 、 IMF_4 和 IMF_5 疑似高频噪声分量, 通过 MATLAB 中的 `xcorr` 函数对其进行自相关函数分析, 结果如图 5。

表 2 剩余分量互相关系数对应表

Table 2 Correspondence table of the correlation coefficient of the remaining components

互相关系数	IMF 分量									
	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6	IMF_7	IMF_8	IMF_9	IMF_{10}
R	0.0796	0.0511	0.0355	0.0359	0.0529	0.2249	0.8984	0.8665	0.2000	0.1023

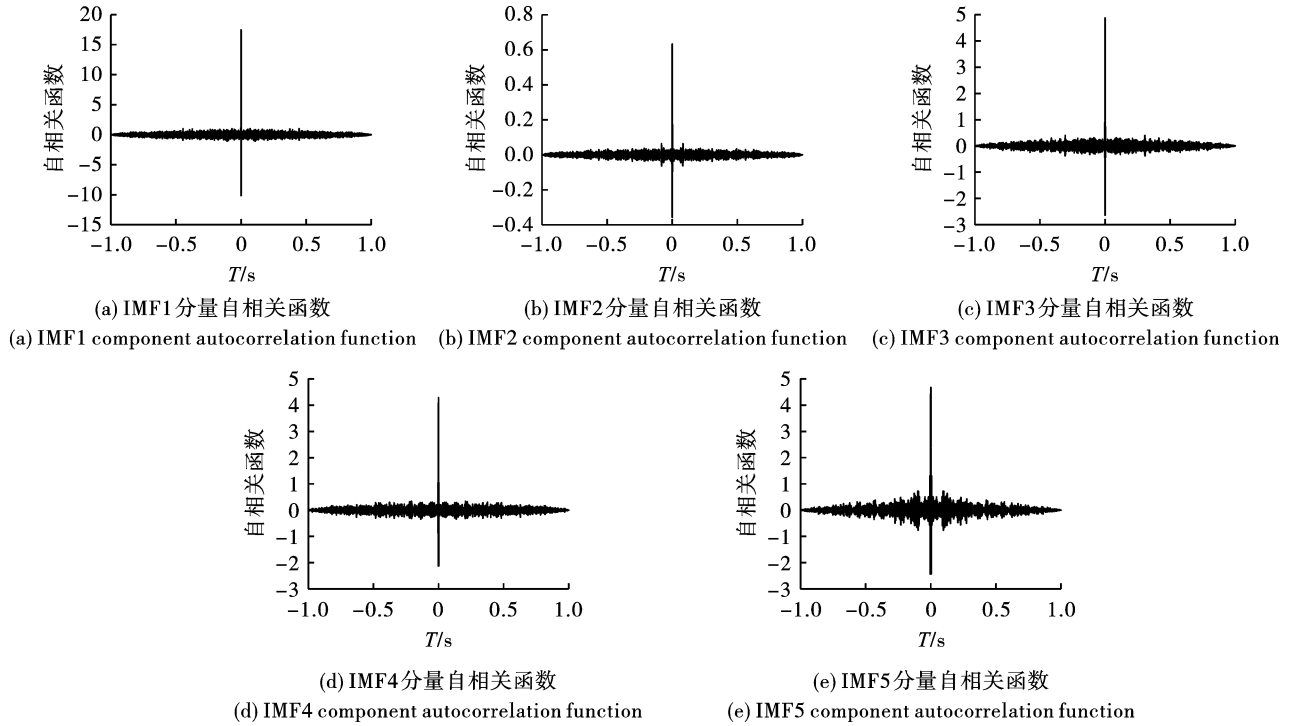


图5 疑似噪声分量自相关函数

Fig. 5 Autocorrelation function of suspected noise component

从图5(a)~(d)分析可知,分量 $IMF_1 \sim IMF_4$ 在零点处的自相关函数达到最大值,其他时间的自相关函数趋近于0,因此定义分量 $IMF_1 \sim IMF_4$ 为高频噪声分量^[19]。由图5(e)可知, IMF_5 分量虽然在零点处自相关函数为最大值,但其余时间处并不完全符合噪声特性,由表1也可知 IMF_5 分量主频为180.7 Hz,主频在有效监测区内,因而 IMF_5 分量同时也包含了一些信号的有效信息,需要对其进行小波阈值滤波去噪处理。由于本文中爆破测振仪器设置的最小采样频率为2 Hz,根据采样定理^[20],设置的采样频率为4000 Hz,奈奎斯特频率为2000 Hz,选取小波基函数“db8”对 IMF_5 分量进行8层分解,其最低频带为0~7.8125 Hz。选取基于Stein的无偏移风险估计原理获得小波阈值和具有光滑性的软阈值函数进行滤波去噪处理。

2.3 波形重构

将纯净IMF分量与滤波去噪处理后分量叠加得到处理后信号。处理(去除趋势项及噪声)前后信号波形及频谱如图6和7所示。分析图6可知:处理后的信号波形回到基线中央,曲线更加光滑,消除了噪声污染影响,保留了信号真实信息。此外,由图7(a)可知,处理前的信号频谱低频段存在突高的相对幅值,高频段存在明显的噪声相对幅值,严重影响了信号频谱分析的准确性。由图7(b)可知,处理后的信号在0~2 Hz低频段较大相对幅值已经消除,表明去趋势项效果显著。2~200 Hz频段振动信号无明显变化,表明处理方法消除噪声干扰外,并不会影响信号的真实信息,而200 Hz以上频段相对幅值基本为零,说明处理方法去除了高频噪声污染。

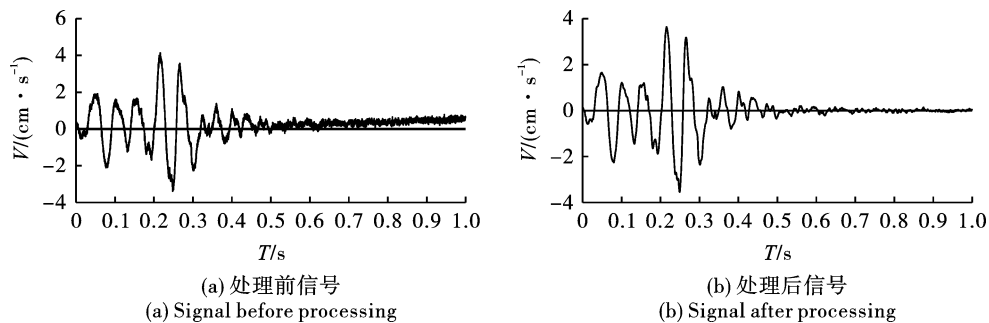


图6 处理前后信号波形

Fig. 6 Signal waveform before and after processing

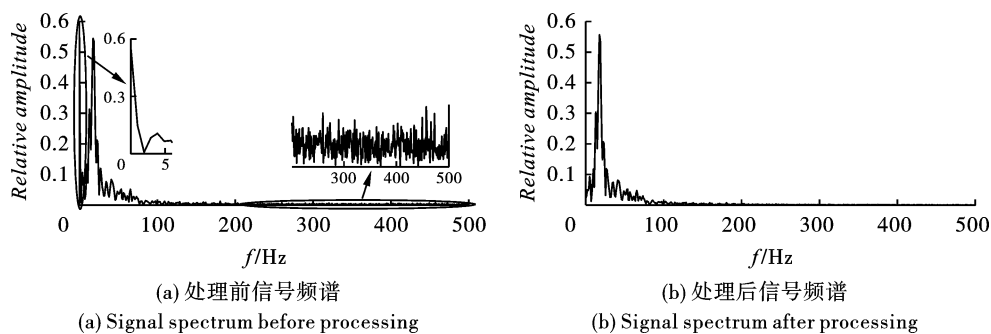


图 7 处理前后信号频谱

Fig. 7 Signal spectrum before and after processing

2.4 对比分析

为了反应处理方法的效果,将信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)作为处理效果的衡量指标,一般认为 SNR 越大, RMSE 越小,其处理效果越好。其计算公式如下

$$SNR = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - x_i)^2} \right] \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - x_i)^2}{N}} \quad (11)$$

式中: X_i 为处理前信号; x_i 为处理后信号; N 为信号长度。

将本文处理方法与单纯的 CEEMDAN 方法、小波阈值方法以及 EMD-小波阈值法、EEMD-小波阈值法和 CEEMD-小波阈值法在衡量指标上进行对比,对比结果如表 3。

从表 3 可以看出,在信噪比方面,CEEMDAN 方法、小波阈值法与本文方法相比,本文处理方法最高,CEEMDAN 方法次之,小波阈值方法最小,说明 CEEMDAN 方法处理不够理想,容易丢失部分真实信息,而小波阈值处理效果不如其他两种方法。本文较 EMD-小波阈值法、EEMD-小波阈值法和

CEEMD-小波阈值法相比信噪比也有所提高,说明本文处理效果更好;在均方根误差方面,CEEMDAN-小波阈值法较其他几种方法相比也显示出更好的可靠性与稳定性。综上所述,经过与目前广泛采用的多种信号处理方法比较,本文应用的 CEEMDAN-小波阈值处理方法最优。

表 3 衡量指标对比

Table 3 Comparison of measurement indicators

处理方法	SNR	RMSE
CEEMDAN 方法	19.935	0.091
小波阈值方法	18.172	0.111
EMD-小波阈值法	20.060	0.090
EEMD-小波阈值法	20.184	0.089
CEEMD-小波阈值法	20.267	0.088
本文方法	20.460	0.086

为了进一步反映 CEEMDAN-小波阈值方法的处理效果,使用 Hilbert 变换获得时间、频率和能量的三维图来反应处理前后的变化情况。处理前后的三维图如图 8 所示。

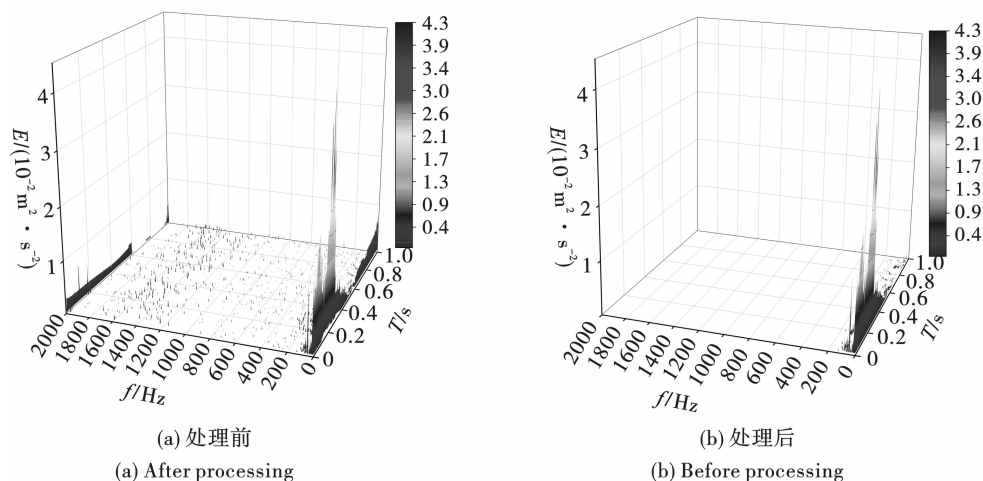


图 8 处理前后三维图

Fig. 8 Three-dimensional image before and after processing

从图8(a)分析可知,由于趋势项的干扰,源信号在0~0.6 s的高频段(2000Hz左右)以及0.6~1 s的低频段(0~2 Hz)出现较大能量的分量,而由于噪声干扰,在200~2000 Hz频段上也出现了较小的噪声能量,这就导致了信号的失真,从而增大爆破振动信号分析的误差甚至致使其结果严重不符合实际。从图8(b)可以看出,上述由于趋势项和噪声引起的能量分量通过CEEMDAN-小波阈值方法处理后被成功剔除,而0~200 Hz频段能量没有明显变化,说明CEEMDAN-小波阈值方法不仅能消除趋势项和噪声干扰,而且对2~200 Hz频段能量信息保留完整。

3 结论

针对爆破施工中采集的振动信号的高频噪声和趋势项问题,使用CEEMDAN分解和小波阈值法共同处理信号。通过实例分析,得出以下结论:

(1)结合CEEMDAN分解与小波阈值法的优势处理爆破振动信号的高频噪声与趋势项问题,为趋势项的准确筛选与去除做了新的研讨,相比于目前广泛采用的方法信噪比更高,均方根误差更小,提高了爆破振动信号处理的精度。

(2)对比CEEMDAN-小波阈值方法处理前后的信号波形、频谱及三维时频能量分析,证明本文方法能有效处理高频噪声及趋势项的干扰,而且不会影响信号的真实频率、能量信息,更利于爆破振动响应研究中的应用。

参考文献 (References)

- [1] CHEN G A, LI Q, LI D, et al. Main frequency band of blast vibration signal based on wavelet packet transform [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 74: 569-585. DOI:10.1016/j.apm.2019.05.005.
- [2] 刘玉桥,邓红卫,吴路波,等.基于VMD联合小波阈值去噪法的微震监测信号去噪研究[J].矿业研究与开发,2020,40(2):6.
- [2] LIU Yu-qiao, DENG Hong-wei, WU Lu-bo, et al. Research on denoising of microseismic monitoring signals based on VMD combined with wavelet threshold denoising method [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 6. (in Chinese)
- [3] 夏晨曦,杨军,李顺波,等.最优小波包基算法在爆破振动信号去噪中的应用[J].爆破,2011,28(3):4-7.
- [3] XIA Chen-xi, YANG Jun, LI Shun-bo, et al. Application of optimal wavelet packet basis algorithm in denoising of blasting vibration signal[J]. Blasting, 2011, 28(3): 4-7. (in Chinese)
- [4] 易文华,刘连生,闫雷,等.基于EMD改进算法的爆破振动信号去噪[J].爆炸与冲击,2020,40(9):77-87.
- [4] YI Wen-hua, LIU Lian-sheng, YAN Lei, et al. Denoising of blasting vibration signal based on improved EMD algorithm[J]. Explosion and Shock, 2020, 40(9): 77-87. (in Chinese)
- [5] 韦啸,高文学,王林台,等.基于EEMD的地铁隧道爆破振动信号分析与应用研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(8):8.
- [5] WEI Xiao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Analysis and application research of subway tunnel blasting vibration signal based on EEMD [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2019, 39(8): 8. (in Chinese)
- [6] 张亮,孙新建,占其兵.基于CEEMD和相关性函数特性的爆破震动信号滤波方法研究[J].水利水电技术,2017,48(6):37-42.
- [6] ZHANG Liang, SUN Xin-jian, ZHAN Qi-bing. Research on the filtering method of blasting vibration signal based on CEEMD and correlation function characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2017, 48(6): 37-42. (in Chinese)
- [7] 饶运章,王柳,饶睿,等.基于EMD与小波阈值的爆破震动信号去噪方法[J].福州大学学报(自然科学版),2015,43(2):271-7.
- [7] RAO Yun-zhang, WANG Liu, Rao Rui, et al. Denoising method of blasting vibration signal based on EMD and wavelet threshold [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(2): 271-7. (in Chinese)
- [8] 邓青林,赵国彦.基于EEMD和小波的爆破振动信号去噪[J].爆破,2015,32(4):33-38.
- [8] DENG Qing-lin, ZHAO Guo-yan. Denoising of blasting vibration signal based on EEMD and wavelet [J]. Blasting, 2015, 32(4): 33-38. (in Chinese)
- [9] 邵东辉.基于CEEMD低通的隧道爆破振动信号去噪[J].工程爆破,2017,23(6):5-10.
- [9] SHAO Dong-hui. Denoising of tunnel blasting vibration signal based on CEEMD low-pass [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(6): 5-10. (in Chinese)
- [10] DYBALA J, ZIMROZ R. Rolling bearing diagnosing method based on Empirical Mode Decomposition of machine vibration signal [J]. Applied Acoustics, 2014, 77 (mar.): 195-203. DOI:10.1016/j.apacoust.2013.09.001.